Advanced Engineering Research 2021. Т. 21, № 4. С. 337−345. ISSN 2687−1653





УДК 621.22 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345

Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах

А. Т. Рыбак[1] ✉, **А. В. Ивановская**[2] , **П. П. Батура**[1] , **А. Ю. Пелипенко**[1]
[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», КГМТУ (г. Керчь, Республика Крым)
✉2130373@mail.ru

Введение. Статья посвящена анализу конструктивных решений гидравлических делителей потока, используемых для синхронизации гидравлических приводов рабочих органов технологических и мобильных машин. Выявлены потребности рынка в многопоточных беззолотниковых дроссельных делителях потока с управляемым коэффициентом деления, таких как многоосные шасси транспортных средств.
Целями работы были анализ возможности и обоснование целесообразности разработки дроссельного четырехпоточного делителя потока беззолотникового типа с чувствительными элементами типа трубка Вентури. Решение должно обеспечить синхронность перемещения (вращения) более трех рабочих органов технологических и мобильных машин.
Материалы и методы. Исследованы патенты существующих конструкций гидравлических делителей потока. Рассмотрены системы, в которых требуется деление потока гидравлической жидкости более чем на два исполнительных органа. Для конструкции дроссельного трехканального делителя потока беззолотникового типа предложен вариант модернизации, который позволяет делить поток на четыре ветви.
Результаты исследования. Обоснована актуальность разработки многопоточного дроссельного делителя потока беззолотникового типа для применения в промышленных и мобильных машинах. Рассмотрены два типа четырехпоточных делителей, указаны их слабые стороны. Отмечено, что разработка многопоточного дроссельного делителя потока на основе конструкций, созданных в 1989 и 1991 годах, позволит сократить число гидронасосов, избавиться от последовательного соединения двухпоточных делителей. Таким способом можно снизить потери давления в гидросистеме и реализовать адаптивное управление гидродвигателями многодвигательных мобильных машин. Показана возможность на базе трехпоточного дроссельного делителя получить делитель-сумматор на четыре потока путем добавления выпускной камеры, связанной с камерой мембраны через канал, входящий в сопло трубки Вентури. Описан принцип работы такого оборудования.
Обсуждение и заключения. Рассмотрены принципы построения дроссельных делителей потока беззолотникового типа. Предложен вариант модернизации для увеличения количества каналов деления с трех до четырех. Однако для подтверждения работоспособности такой конструкции необходим численный анализ различных режимов работы делителя — расчет приведенной объемной жесткости его рабочих полостей. Полученная информация может быть использована для модернизации гидравлических узлов технологических и мобильных машин, повышения их надежности, технологичности и коэффициента полезного действия. Определены вопросы, которые необходимо решить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: дроссельный делитель потока, трубка Вентури, гидравлическая трансмиссия, многоосное шасси, транспортная платформа, синхронизация.

Для цитирования: Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах / А. Т. Рыбак, А. В. Ивановская, П. П. Батура, А. Ю. Пелипенко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 337–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345

© Рыбак А. Т., Ивановская А. В., Батура П. П., Пелипенко А. Ю., 2021



Synchronization in multi-motor hydromechanical systems

A. T. Rybak[1], **A. V. Ivanovskaya**[2], **P. P. Batura**[1], **A. Yu. Pelipenko**[1]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Kerch State Maritime Technological University (KGMTU) (Kerch, Russian Federation)
2130373@mail.ru

Introduction. The paper submits the analysis of existing design solutions of flow dividers used to synchronize hydraulic drives of working bodies of technological and mobile machines. The market demands for multithreaded throttle flow dividers without valves with the controlled division ratio, such as multi-axle vehicle chassis, are identified. The objective of the work was to analyze the possibility and rationale for developing a throttle four-way flow divider without valves with sensing elements of the Venturi tube type. The solution should provide the synchronicity of movement (rotation) of more than three working bodies of technological and mobile machines.
Materials and Methods. A patent search for the designs of hydraulic flow dividers is carried out, and systems that require the division of the hydraulic fluid flow into more than two executive bodies are considered. An upgrade option, which allows dividing the flow into four branches, is proposed for the design of a three-channel throttle flow divider without valves.
Results. The urgency of developing a multithreaded throttle flow divider without valves for application in industrial and mobile machines is validated. Two types of four-flow dividers are considered, their weaknesses are indicated. It is noted that the development of a multithreaded throttle flow divider based on the designs created in 1989 and 1991 will reduce the number of hydraulic pumps and get rid of the series connection of double-flow dividers. In this way, it is possible to reduce pressure losses in the hydraulic system and implement adaptive control of hydraulic motors of multi-motor mobile machines. The possibility to obtain a divider/combiner into four flows by adding an outlet chamber connected to the membrane chamber through a channel entering the Venturi nozzle on the basis of a three-flow throttle divider is shown. The principle of operation of such equipment is described.
Discussion and Conclusions. The principles of construction of throttle flow dividers without valves are considered. An upgrade option is proposed to increase the number of division channels from three to four. However, to validate the operability of this design, a numerical analysis of the various modes of operation of the divider is required — calculation of the reduced volumetric stiffness of its working cavities. The information obtained can be used to modernize the hydraulic units of technological and mobile machines, increase their reliability, manufacturability, and efficiency. The issues that need to be solved in further research are identified.

Keywords: throttle flow divider, Venturi tube, hydraulic transmission, multi-axle chassis, transport platform, synchronization.

For citation: A. T. Rybak, A. V. Ivanovskaya, P. P. Batura, A. Yu. Pelipenko. Synchronization in multi-motor hydromechanical systems. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 337–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345

Введение. Условие абсолютной синхронизации — соблюдение пропорциональности линейных и угловых перемещений гидродвигателей и всех производных от них по времени. Часто бывает необходимо синхронизировать:

— однородные линейные или вращательные движения двух и более гидроприводов,

— один двигатель с поворотом второго.

В станкостроении и машиностроении при синхронизации приводов важно учитывать ошибки синхронизации по положению. В статье рассмотрены способы синхронизации гидродвигателей в многодвигательных системах с делителем потока, а также примеры применения таких систем в промышленности. Помимо этого обсуждается применение многопоточного дроссельного делителя потока беззолотникового типа в качестве синхронизирующего устройства многоосной колесной сцепки гидравлической транспортной платформы.

Фундаментальные труды о гидромеханических системах известны с древности. Самый ранний из сохранившихся — трактат Архимеда «О плавании тел». Сегодня применение сложных многоуровневых и разветвленных гидросистем достаточно исследовано, однако остается актуальным вопрос управления и регулирования в гидроприводе[1, 2] [1–4] для повышения его КПД и уменьшения габаритов системы.

[1] Урекин В. С., Истомина Ю. В. Разработка гидравлических систем автоматического управления приводами технологического оборудования // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. II Всерос. науч.-тех. конф. Пенза : Межотраслевой науч.-инф. центр, 2016. С. 259–262.
[2] Лазута И. В., Лазута Е. Ф. Нелинейная корреляция релейной автоматической системы управления гидравлическим приводом // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. науч. тр. нац. науч.-практ. конф. Омск : СибАДИ, 2018. С. 64–69.

В разряд сложных гидросистем входят такие, где один гидронасос питает два или более независимых гидродвигателя. При этом независимо от нагрузки на выходные звенья должна обеспечиваться синхронность их движений. Требуемая точность синхронизации определяет выбор ее способа. Простейший из них — обеспечение жесткой механической связи гидродвигателей. Однако для систем со сложным расположением исполнительных органов в пространстве он не применим. Наиболее распространенные методы:

— с помощью связанных валом гидромоторов или гидронасосов (объемная синхронизация);

— с последовательным соединением полостей гидродвигателей;

— с гидравлическими следящими системами с распределителями и гидротахометрами,

— с гидромеханическими и электрогидравлическими следящими системами.

Наиболее целесообразные и простые средства синхронизации в мобильных машинах и технологическом оборудовании — это дроссельные делители и сумматоры потоков[3, 4] [5–8]. Гидравлический делитель потока разделяет один поток рабочей жидкости на два или более. При этом учитывается заданное соотношение и требуется обеспечить синхронное (согласованное) движение выходных звеньев независимо от их нагрузки. Сумматор потока действует аналогично делителю, но в обратном направлении. Он легко интегрируется в гидравлическую систему, дешев и удобен в эксплуатации. Сумматоры потока обеспечивают синхронизацию в широком диапазоне скоростей движения выходных звеньев гидродвигателей.

В классической конструкции дроссельного делителя в качестве запорно-регулирующего элемента используются золотниковые пары [5]. Это обусловливает характерные недостатки таких делителей. Например, высокая себестоимость прецизионных золотниковых пар объясняется сложностью изготовления, большой долей таких высокоточных операций, как хонингование, шлифование, электроэрозионная обработка. Селективная сборка и доводка золотниковых пар делает их практически неремонтопригодными, что тоже повышает их эксплуатационную стоимость. Вышеизложенное также указывает на восприимчивость системы к качеству гидравлической жидкости, к которой предъявляют весьма высокие требования [6].

Известны попытки конструировать делители без золотниковых пар[5, 6, 7, 8]. Исследовались возможности улучшения характеристик золотниковых делителей. Следует отметить, что перечисленные конструкции делителей потока обеспечивают синхронизацию только двух исполнительных механизмов, и это значительно сужает сферу их применения. Цель настоящего исследования — поиск перспективной конструкции многопоточного дроссельного делителя, отвечающего требованиям эксплуатации мобильных машин.

Материалы и методы

Многодвигательные гидромеханические системы. Известны гидросистемы, в состав которых входит более двух рабочих органов (как реверсируемых, так и не реверсируемых). В зависимости от условий эксплуатации они требуют постоянной или кратковременной синхронности движения с постоянным или изменяемым соотношением скоростей. К таким системам, в частности, можно отнести:

— ходовые гидроприводы мобильных машин,

— вытягивающие прессы для крупного листового проката,

— штамповочные станки для габаритных деталей,

— группы гидродомкратов для подъема фундаментов зданий,

— гидроприводы складывания рулевого оперения в аэрокосмической технике,

— системы позиционирования лепестков рефлекторного зеркала радиотелескопа.

Применение в таких системах известных дроссельных делителей потока беззолотникового типа, несомненно, улучшает эксплуатационные характеристики. В то же время число синхронизируемых рабочих органов ограничено двумя на один делитель потока. Данное ограничение вынуждает конструкторов использовать последовательное каскадирование делителей потока. Вследствие этого на выходе из каскадов деления растут потери давления (до 30 %) и суммируется ошибка синхронизации каждого делителя. Немаловажно и увеличение объема, занимаемого гидроаппаратурой. В целом, такой подход технически не оправдан и затратен в финансовом отношении.

[3] Яцухин Ю. А. Исследование гидравлической системы синхронизации движения рабочих органов сельскохозяйственных машин : автореф. дис. … канд. тех. наук. Ростов н/Д, 1972. 25 с.

[4] Рыбак А. Т. Изыскание рационального типа запорно-регулирующего элемента дроссельного делителя потоков гидроприводов синхронных механизмов сельскохозяйственных машин : автореф. дис ... канд. тех. наук. Ростов н/Д, 1989. 23 с.

[5] Делитель потока : патент 1041773 СССР : F 15 B 11/22 / Р. П. Кириков, Э. Б. Шерман, В. Л. Кузик [и др.]. № 3336116/25–06 ; заявл. 03.09.1981 ; опубл. 15.09.1983, Бюл. № 34. 3 с.

[6] Делитель расхода : патент 1566897 Франция / № 150410 ; заявл. 03.05.1968 ; опубл. 1970.

[7] Дроссельный делитель потока : а. с. 1151725 СССР : F 15 B 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. Н. Негодов [и др.]. № 3583155/25–06 ; заявл. 26.04.1983 ; опубл. 23.04.1985, Бюл. № 15. 3 с.

[8] Flow divider : патент 10578221 США / №15/730,196 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 03.05.2020.

В этой связи стоит отметить конструкцию дроссельного делителя потока мембранного типа[9]. Его можно использовать в реверсивных гидросистемах, в которых нужно динамично менять соотношение скоростей исполнительных органов. Кроме того, данная конструкция позволяет создать на ее основе делитель на 3, 4 и более независимых потоков[10].

Рассмотрим применение дроссельного делителя потока беззолотникового типа на примере гидрообъемной трансмиссии колесного привода многоосных транспортных шасси.

Для конструирования трансмиссионных систем современных полноприводных автомобилей, как правило, применяются блокированная и дифференциальная схема. Блокированная трансмиссия обеспечивает жесткую связь ведущих колес. Дифференциальная характеризуется разветвлением одного входящего потока мощности между ведущими мостами и колесами через специальный дифференциальный узел. Существуют и комбинированные трансмиссионные схемы, в которых одна часть колес объединена дифференциальной связью, а другая — блокированной (например, блокировка нескольких дифференциалов). Для трансмиссионных систем невозможна принудительная регулировка:

— подводимой мощности к одному или нескольким колесам,

— одного моста независимо от других.

Наличие в трансмиссионной системе шасси гидропривода позволяет индивидуально подводить мощности к колесам и обеспечивает бесступенчатое регулирование в широком диапазоне значений. Конструкция гидропривода компактна, устойчива к внешним атмосферным воздействиям. К тому же у гидропривода, как правило, большой диапазон регулирования, что важно для автомобиля высокой проходимости. Еще одно преимущество гидрообъемного привода колес — возможность быстрого реверсирования. Это важно при прохождении препятствий путем раскачивания. Гидрообъемный привод колес обеспечивает длительное движение на минимальной скорости с высоким тяговым усилием, что также повышает проходимость автомобиля.

Гидравлическая схема ходовой части для одной оси такой машины в общем виде представлена на рис. 1.

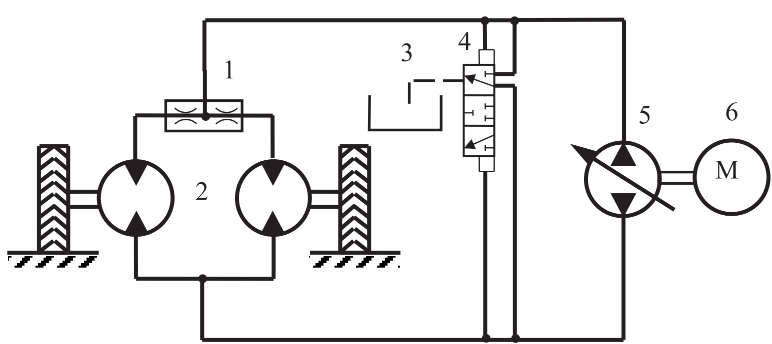


Рис. 1. Гидравлическая схема одной колесной оси мобильной транспортной машины

Рассмотрим систему гидрообъемной трансмиссии. Двигатель внутреннего сгорания 6 передает крутящий момент на реверсивный гидронасос 5, который соединен трубопроводами и гидрораспределителем 4 с делителем потока 1 и гидромоторами 2. Валы гидромоторов связаны с ведущими колесами. Зачастую аксиально-поршневые или радиально-поршневые гидродвигатели конструктивно соединены с колесом. Такая компоновка образует единый узел «гидромотор — колесо». Во время работы двигателя гидронасос обеспечивает гидромоторы ведущих колес гидродинамическим напором жидкости, который в дальнейшем преобразуется в механическую работу. В зависимости от конструктивного исполнения гидроагрегатов рабочее давление в системе находится в диапазоне 25–50 МПа. Эксплуатация узла «гидромотор — колесо» повышает проходимость шасси в результате непрерывного потока мощности и плавного изменения крутящего момента.

Компании Scheuerle и Kamag (Германия) выпускают модульные гидравлические транспортные платформы: средние — FlatCombi K22 и тяжелые самоходные — InterCombi K25 (рис. 2).

Модули средних серий шириной 2750 и 3000 мм рассчитаны на нагрузку 23 и 25 т на одну ось при скорости до 10 км/ч. Модули тяжелых серий оснащают 2–6-колесными осями. Ширина платформы — 3000 и 3100 мм, нагрузка на одну ось — 36–45 т. Самоходные модули приводятся в движение силовыми установками PowerBooster. Варианты их объединения:

[9] Дроссельный делитель потока : патент 1670191 СССР : F 15 B 11/22 / Ю. А. Яцухин, Л. П. Колосов, А. Т. Рыбак [и др.]. № 3841241/29 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 15.08.1991, Бюл. № 30. 3 с.

[10] Многопоточный делитель-сумматор потоков : патент 1742530 СССР : F 15 B 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. И. Антоненко. № 4694140/29 ; заявл. 23.05.1989 ; опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23. 2 с.

http://vestnik-donstu.ru

— одна платформа, на которую укладывают мостовое строение,
— две тележки с опорно-поворотными столами.



Рис. 2. Два соединенных 6-осных самоходных модуля InterCombi K25 компании Kamag (Германия)

В отечественном машиностроении можно выделить перспективную конструкцию многоосного, полностью гидравлического шасси, разработанную Центральным научно-исследовательским автомобильным и автомоторным институтом «НАМИ». Это трехосный автомобиль «Гидроход-49061»[11] (рис. 3).



Рис. 3. Автомобиль НАМИ «Гидроход-49061»

В конструкции этой машины реализована идея «гибкого колесного привода», которая предусматривает индивидуальный гидронасос для каждой из трех колесных осей. Транспортер построен на базе шасси «ЗИЛ-4906». Оснащение шасси гидрообъемной трансмиссией позволяет реализовать все возможные типы колесных трансмиссий: блокированный, дифференциальный, с индивидуальным регулированием — и их комбинации. Промышленность заинтересована в развитии производства объемно-гидравлических колесных шасси высокой проходимости, что стимулирует новые исследования в этой области.

Делители потока широко применяются в схемах гидравлических трансмиссий для обеспечения блокирования дифференциала, что позволяет увеличить проходимость препятствий. Делитель потока гарантирует, что оба синхронизируемых колеса всегда будут создавать тяговое усилие, даже если одно из них находится на мягком или скользком грунте. Но для синхронизации и управления потоком в 4- и 6-осной конструкции необходимо последовательно соединить несколько делителей, причем с изменяемым соотношением деления по управляющему сигналу.

Результаты исследования. Рассматриваемые четырехпоточные делители можно отнести к одному из двух типов. В первом случае речь идет о конструкциях с золотником. Это каскад из трех делителей потока в

[11] Прочко Е. И. Методы построения систем силовых гидрообъемных приводов колес полноприводных автомобилей : автореф. дис. … канд. тех. наук. М., 2007. 20 с.

одном корпусе. В качестве примера можно привести делитель потока Poclain FD-M4 (Франция)[12]. На рис. 4 изображены его внешний вид и гидравлическая схема.

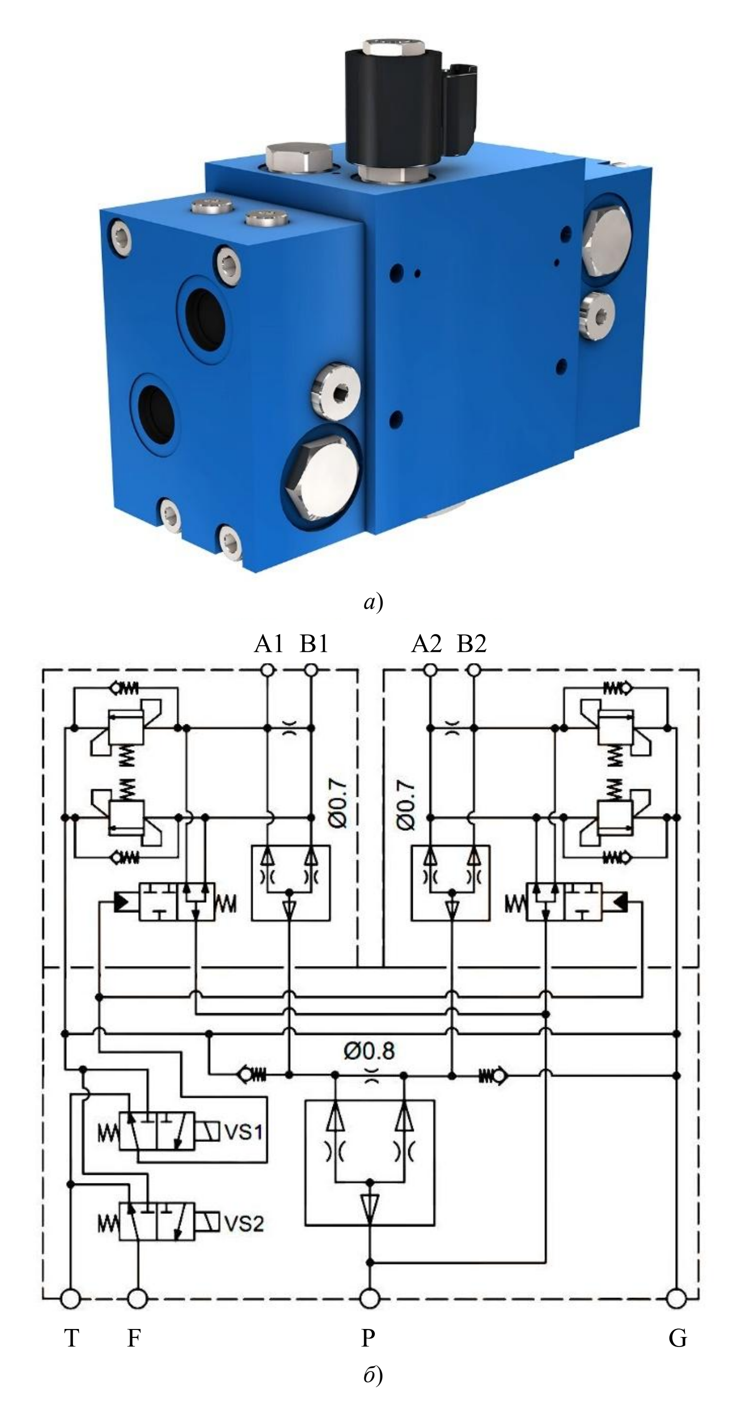


Рис. 4. Четырехпоточный делитель потока Poclain FD-4M: внешний вид (*а*), принципиальная гидравлическая схема (*б*)

В конструкциях второго типа не предусмотрена возможность менять соотношение деления по внешнему управляющему сигналу. Это ограничивает сферу применения делителей в управляемых многодвигательных гидросистемах. Разработка многопоточного дроссельного делителя потока на основе конструкций, созданных в 1989 и 1991 годах[13, 14], позволит сократить число гидронасосов, избавиться от последовательного соединения двухпоточных делителей (соответственно, снизить потери давления в

---

[12] Каталог продукции компании Poclain Hydraulics / POCLAIN Hydraulics // www.poclain-hydraulics.com [сайт]. URL: https://www.poclain-hydraulics.com/_upload/ressources/media/pdf/B33971Z.pdf (дата обращения: 18.01.2021).

[13] Дроссельный делитель потока : патент 1670191 СССР : F 15 B 11/22 / Ю. А. Яцухин, Л. П. Колосов, А. Т. Рыбак [и др.]. № 3841241/29 ; заявл. 02.01.1985 ; опубл. 15.08.1991, Бюл. № 30. 3 с.

[14] Многопоточный делитель-сумматор потоков : патент 1742530 СССР : F 15 B 11/22 / А. Т. Рыбак, Ю. А. Яцухин, В. И. Антоненко. № 4694140/29 ; заявл. 23.05.1989 ; опубл. 23.06.1992, Бюл. № 23. 2 с.

гидросистеме), а также реализовать адаптивное управление гидродвигателями многодвигательных мобильных машин [7].

Так, например, можно получить делитель-сумматор на четыре потока (рис. 5) путем добавления выпускной камеры 16, связанной с камерой мембраны 10 через канал, входящий в сопло трубки Вентури 3. При этом левые камеры 15, 16 и правые камеры 17, 18 можно связать подвижным плунжером 13 между камерами 16 и 17.

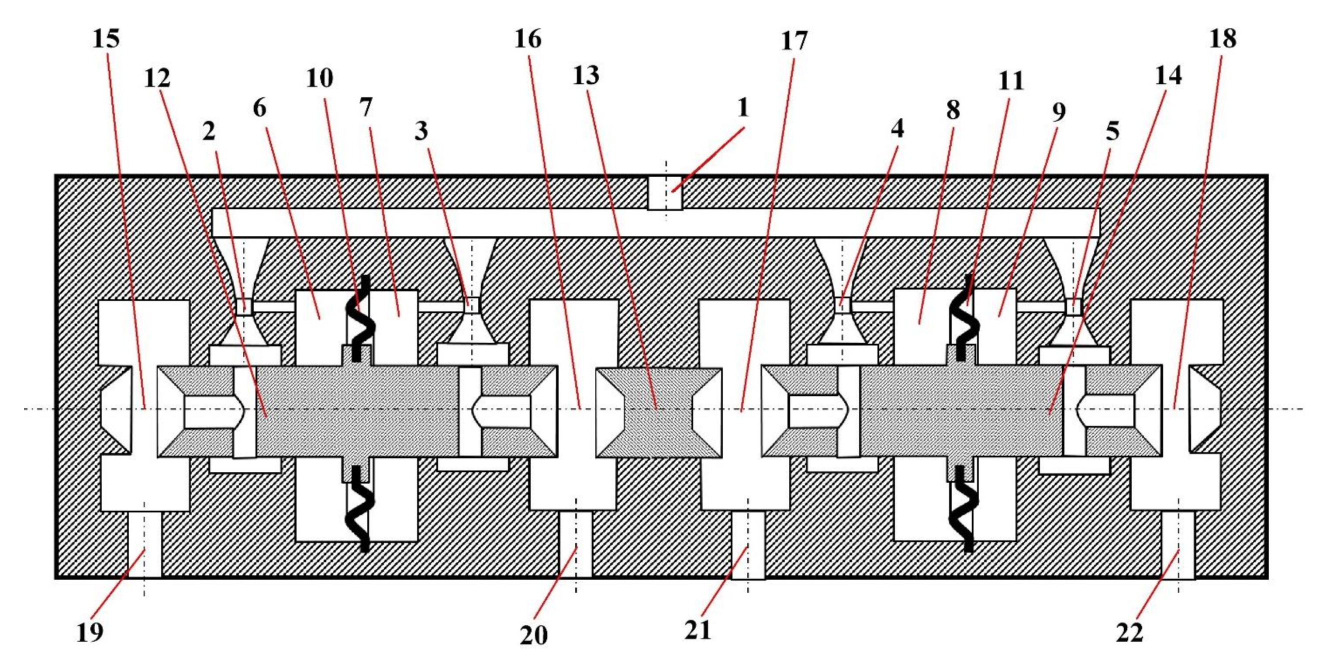


Рис. 5. Четырехпоточный делитель с чувствительными элементами типа трубка Вентури

Опишем принцип работы делителя-сумматора потоков с чувствительными элементами в виде трубок Вентури. Во время деления потока рабочая жидкость направляется на вход делителя-сумматора 1. Далее потоки разделяются между чувствительными элементами 2, 3, 4 и 5. Они выполнены в виде трубок Вентури, и их горловины соединены с прилегающими рабочими камерами 6, 7, 8 и 9. При этом камеры 6, 7 и 8, 9 — исполнительные элементы конструкции. Они отделены друг от друга мембранами 10 и 11 и жестко закреплены в теле подвижных плунжеров 12 и 14. Подвижный плунжер 13 обеспечивает связь между левой и правой частями делителя. После трубок Вентури потоки жидкости проходят через осевые и радиальные проточки плунжеров 12 и 13, а далее попадают на переменные сопротивления 15, 16 и 17, 18 и к выходным каналам 19, 20 и 21, 22.

Допустим, гидродвигатели на всех ветвях испытывают одинаковую нагрузку. Соответственно, в ветвях расходы одинаковы, а, значит, одинаковы и расходы через соответствующие им трубки Вентури. В горловинах трубок Вентури будут одинаковые скоростные напоры, поэтому давления в камерах управления будут также равны. С обеих сторон будет одинаковым давление на стенки мембранных элементов исполнительных механизмов, и это приведет их в уравновешенное состояние.

В случае возрастания нагрузки (например, на гидродвигателе присоединенном к выходному каналу 19) сократится расход в соответствующей ветви и соединенной с ней трубкой Вентури 2. Как следствие, уменьшится скоростной напор в ее горловине, а, значит, давление в ней увеличится. В свою очередь, это приведет к повышению давления в рабочей камере 6. В результате нарушится равновесие мембраны 10, и она будет сдвигаться вправо. Плунжер 12 также станет перемещаться вправо, сужая живое сечение переменных сопротивлений 16 и 17, которые через подвижный плунжер 13 связаны с сопротивлением 16. В результате в соответствующих ветвях и трубках Вентури 3 и 4 расход уменьшится. Плунжер 14 начнет перемещаться вправо и уменьшит живое сечение переменного сопротивления 18. Этот процесс будет продолжаться до уравновешивания расходов во всех ветвях делителя.

В режиме суммирования потоки для объединения подводятся к выходным каналам делителя-сумматора, и его рабочий процесс идет в обратном порядке.

Стоит отметить, что еще на стадии разработки необходимо знать надежность и функциональные свойства предложенной конструкции делителя-сумматора. Лучшие способы получить необходимые данные — моделирование и численные эксперименты[15] [9–13].

Обсуждение и заключения. Широкое применение многодвигательных разветвленных гидравлических систем в промышленной и мобильной технике часто предполагает синхронизацию их исполнительных механизмов. В зависимости от условий эксплуатации и требований к функциональности используются решения на основе сложных конструкций из регулируемых объемных гидромашин или дроссельных делителей потока [5–8]. В случаях, когда необходимо задействовать механизм согласования на короткое время, наиболее экономичным, на наш взгляд, способом синхронизации является использование дроссельного делителя потока. Рассмотренные гидромашины (рис. 2, 3) в полной мере соответствуют понятию многодвигательной гидросистемы. Применение дроссельных делителей потока в конструкции ведущих колесных осей таких машин обеспечит реализацию дифференциальной схемы без механической трансмиссии. Это повысит проходимость и позволит эффективно управлять гидроприводами колесной пары.

На рынке не представлены многопоточные дроссельные управляемые делители потока. Это указывает на востребованность их разработки.

Дальнейшая работа по проектированию четырехпоточного делителя-сумматора потока описанной в статье конструкции будет направлена на создание математической модели. Ее базой станут основы теории объемной жесткости[16, 17, 18] [14–16]. Это позволит уточнить физические размеры элементов делителя-сумматора и рассчитать допустимые режимы работы.

Библиографический список

1. Симанин, Н. А. Адаптивное управление гидравлическим приводом металлорежущего станка / Н. А. Симанин, В. В. Коновалов, Ю. В. Родионов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2017. — Т. 23, № 2. — С. 338–347. 10.17277/vestnik.2017.02

2. Гидравлическая стабилизация нагруженных высокоскоростных пневматических приводов / В. А. Королев, И. Л. Коробова, С. М. Стажков, Б. Н. Воротынцев // Мехатроника, автоматика и робототехника. — 2019. — № 4. — С. 34–38. https://doi.org/10.26160/2541-8637-2019-4-34-38

3. Селиванов, А. М. Принцип комбинированного регулирования скорости выходного звена гидравлического привода и его современная реализация / А. М. Селиванов // Вестник Московского авиационного института. — 2011. — Т. 18, № 3. — С. 147–151.

4. Сунарчин, Р. А. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих приводах / Р. А. Сунарчин, М. А. Машков, А. В. Матросов // Динамика и виброакустика. — 2018. — Т. 4, № 3. — С. 16–25. https://doi.org/10.18287/2409-4579-2018-4-3-16-25

5. Скрицкий, В. Я. Синхронизация исполнительных органов гидрофицированных машин и механизмов / В. Я. Скрицкий, В. А. Рокшевский. — Москва : Машиностроение, 1973. — 140 с.

6. Рыбак, А. Т. Дроссельные делители и делители-сумматоры потоков синхронных гидросистем мобильных машин и технологического оборудования / А. Т. Рыбак // Вестник Донского государственного технического университета. — 2005. — Т. 5, № 2. — С. 179–188.

7. Рыбак, А. Т. Дроссельные делители и делители-сумматоры потоков для разветвленных гидравлических систем / А. Т. Рыбак // Вестник Донского государственного технического университета. — 2005. — Т. 5, № 1 (23). — С. 28–35.

8. О перспективных направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, В. Ф. Тамело // Наука и техника. — 2012. — № 6. — С. 71–76.

9. Kobzev, K. Learning the basics of a battery pack control system / K. Kobzev, S. Vyalov, A. Rybak // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 164. — P. 13006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016413006

[15] Рыбак А. Т. Моделирование гидравлических систем на основе теории объемной жесткости / А. Т. Рыбак // Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. Дивноморское : ДГТУ-Принт. 2017. С. 234–242.

[16] Мирный В. И. Повышение эффективности быстродействующего гидравлического привода возвратно-поступательного движения : автореф. дис. … канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2008. 21 с.

[17] Затолокин С. А. Совершенствование теории и методов проектирования гидромеханических систем с насосно-аккумуляторным источником расхода постоянного давления : автореф. дис. … канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2009. 18 с.

[18] Устьянцев М. В. Повышение эффективности привода стенда испытаний гидромашин вращательного действия : автореф. дис. … канд. тех. наук. Ростов н/Д, 2012. 18 с.

10. Khinikadze, T. Simulation of the hydraulic system of a device with self-adaptation by power and kinematic parameters on the working body / T. Khinikadze, V. Pershin, Y. Karagodskaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 1001. — P. 012061. 10.1088/1757-899X/1001/1/012061

11. Ивановская, А. В. Обоснование применения гидравлического привода, чувствительного к изменению нагрузки / А. В. Ивановская, Е. В. Богатырева, В. В. Попов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2018. — № 1. — С. 62–68.

12. Pilipenko, S. S. Hydraulic transmission-multiplier drive with dosing modules / S. S. Pilipenko, M. R. Baiguzin, A. P. Potapenkov // Steel in Translation. — 2016. — Vol. 46. — P. 705–710.

13. Bidirectional synchronization control for an electrohydraulic servo loading system / Yong Sang, Weiqi Sun, Fuhai Duan, Jianlong Zhao // Mechatronics. — 2019. — Vol. 62. — P. 102254. 10.1016/j.mechatronics.2019.102254

14. Vanin, V. A. Stepper hydraulic motor with pneumatic (jet) control system in machines with hydromechanical forming links / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1278. — P. 012019. 10.1088/1742-6596/1278/1/012019

15. Приведенная объемная жесткость гидравлических систем / В. П. Жаров, А. Т. Рыбак, С. А. Затолокин, В. И. Мирный // Вестник Донского государственного технического университета. — 2008. — Т. 8, № 4 (39). — С. 177–185.

16. Першин, В. А. Методика функциональной унификации адаптивного модуля гидропривода с функцией стабилизации нагрузки на рабочем органе мобильных машин / В. А. Першин, Т. А. Хиникадзе // Вестник Донского государственного технического университета. — 2018. — Т. 18, № 3. — С. 319‒326. https://doi.org/10.23947/19925980–2018–18–3–318–325

Поступила в редакцию 04.10.2021
Поступила после рецензирования 08.11.2021
Принята к публикации 08.11.2021

Об авторах:

Рыбак Александр Тимофеевич, профессор кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, Scopus, Researcher, ORCID, 2130373@mail.ru

Ивановская Александра Витальевна, доцент кафедры «Судовые энергетические установки» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат технических наук, доцент, Scopus, Researcher, ORCID, invkerch@yandex.ru

Батура Павел Петрович, аспирант кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, stalker-ghost77@mail.ru

Пелипенко Алексей Юрьевич, аспирант кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Scopus, ORCID, pelipenko16a@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Т. Рыбак — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. В. Ивановская — консультации по теме исследования. П. П. Батура — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение анализа литературы, подготовка текста, формулирование выводов. А. Ю. Пелипенко — доработка текста.

Все авторы ознакомлены и согласны с окончательным вариантом рукописи.